

5^a Reunión Española de Optoelectrónica

LIBRO DE ACTAS



11-13 de julio de 2007

Barakaldo (Bilbao metropolitano)

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

5ª Reunión Española de Optoelectrónica OPTOEL'07

11-13 de julio de 2007

**Barakaldo
(Bilbao metropolitano)**

LIBRO DE ACTAS

Editores: J. Zubia, G. Aldabaldetrekú, G. Durana, J. Arrue, F. Jiménez

Estudio del multiplexado para la optimización de memorias holográficas

Multiplexing analysis to holographic memories optimization

Sergi GALLEGO¹, Manuel ORTUÑO¹, Elena FERNÁNDEZ², Cristian NEIPP¹, Andrés MÁRQUEZ¹, Augusto BELÉNDEZ¹ e Inmaculada PASCUAL²

1. Dept. Física Enginyeria de Sistemes i Teoria del Senyal, Universitat d'Alacant (Spain) Apartat 99 E-03080 Alacant. Persona de contacto: Sergi GALLEGO (sergi.gallego@ua.es)
2. Dept. Interuniversitari d'Òptica, Universitat d'Alacant (Spain) Apartat 99 E-03080 Alacant

RESUMEN:

Cuando se multiplexan muchos hologramas en fotopolímeros con espesores superiores a 500 μm aparecen numerosos problemas asociados a la gran atenuación de la luz en el interior del material. Por ello, los espesores de las primeras memorias holográficas comerciales (Aprilis e Inphase por ejemplo) no superan las 300 μm . Para estos espesores los hologramas se almacenan usando todo el espesor físico del fotopolímero. Como todos los hologramas cuentan con el mismo espesor, es relativamente sencillo obtener un esquema de multiplexado que optimice la capacidad de las memorias. Para espesores superiores a 500 μm , las grandes diferencias entre los espesores ópticos efectivos de cada holograma hace necesario predecir adecuadamente la variación de este parámetro para saber la mínima separación entre dos hologramas consecutivos. En este trabajo hemos estudiado con detalle diferentes esquemas de multiplexado para almacenar diferente número de hologramas y analizar formas de optimizar el proceso.

Palabras clave: Almacenamiento de información, Holografía.

ABSTRACT:

Multiplex many holograms in thick photopolymers, more than 500 μm thick, have many problems associated to Beer's law. In fact the commercial holographic memories, (Aprilis and Inphase for example) are around 300 μm thick. For this thickness the gratings are recorded using all the physical thickness of the layer. Since the optical thickness of the multiplexed gratings are similar, it is easy to obtain a optimized time schedule to maximize the capacity of material. For large thickness, more than 500 μm , the different effective optical thickness of each hologram requires an accurate prediction of each effective optical thickness to know the minimum separation of two consecutive multiplexed holograms. In this work we have studied the experimental schedule for multiplexed different number of gratings to optimize the process.

Key words: Data storage, Holography.

1.- Introducción

Con la aparición en el mercado de las primeras memorias holográficas [1-2] basadas en fotopolímeros se han hecho tangibles las ideas propuestas en numerosos trabajos científicos durante las cuatro últimas décadas [3-5]. Para alcanzar altas capacidades de almacenamiento de información, los materiales de registro holográfico necesitan contar con espesores elevados. El hecho de almacenar hologramas con espesores elevados permite tener altas selectividades angulares. Una alta selectividad angular posee la ventaja de que cada holograma sólo será reproducido si el haz de reconstrucción incide exactamente con su respectivo ángulo de Bragg [5], de esta manera se pueden leer separadamente multitud de hologramas grabados en el mismo volumen [5]. No obstante los discos holográficos comerciales únicamente poseen espesores del orden de 300 μm . Esto se debe principalmente a los numerosos problemas que aparecen cuando las películas de fotopolímeros poseen espesores superiores a 0.5 mm. Algunos de estos problemas son de origen técnico, como por ejemplo, la estabilidad del material, posibles deformaciones en los hologramas formados por el encogimiento o pliegues en el material, etc. No obstante, existe otro tipo de problemas intrínsecos a la hora de trabajar con espesores elevados como es el aumento del ruido y de la atenuación de la luz dentro del material. La atenuación de la luz ha sido estudiada ampliamente por nuestro grupo de investigación desarrollando modelos que tienen en cuenta dicha atenuación de la luz dentro del fotopolímero explicado por la ley de Beer que han dado como fruto diversas publicaciones [6-7]. En este trabajo hemos estudiado la influencia de este fenómeno a la hora de multiplexar distinto número de hologramas en el material utilizando diversos esquemas de multiplexado, con el objetivo de que cada holograma posea el mismo rendimiento en difracción (RD).

2.- Experimental

Para llevar a cabo el estudio de este trabajo se ha utilizado un fotopolímero basado en PVA/Acrilamida [8], depositado de tal manera que las capas sólidas poseen un espesor de alrededor de 0.8 mm. Este material posee eosina amarillenta como colorante, por ello la longitud de onda de registro ha sido 532 nm, donde la eosina presenta su máxima absorción, y la de lectura 633 nm, donde la eosina no absorbe la luz. La intensidad de registro ha sido de 5 mW/cm². Los hologramas almacenados han sido redes sinusoidales de frecuencia espacial 1125 líneas/mm. Por lo tanto se trata de redes holográficas de volumen. Para analizar las redes y caracte-

rizarlas (encontrar el espesor y modulación de índice) se ha utilizado la teoría de ondas acopladas de Kogelnik [9].

3.- Resultados y discusión

Una de las principales ventajas de trabajar con fotopolímeros como material de registro holográfico, es la posibilidad de obtener el rendimiento en difracción del holograma almacenado en tiempo real. Por lo que en teoría parece sencillo almacenar infinitud de hologramas con el mismo rendimiento en difracción. No obstante igualar el RD presenta un inconveniente cuando se almacenan redes de difracción inclinadas. En este caso debido a un ligero encogimiento en el material, produce cambios en el ángulo de Bragg [5]. Esto junto a la gran selectividad angular que presentan las redes de volumen con altos espesores hace poco factible el igualar el RD como se observa en la figura 1. En la fig. 1 presentamos el resultado de multiplexar 7 hologramas y se puede comprobar las diferencias de rendimiento en difracción (RD) entre los mismos.

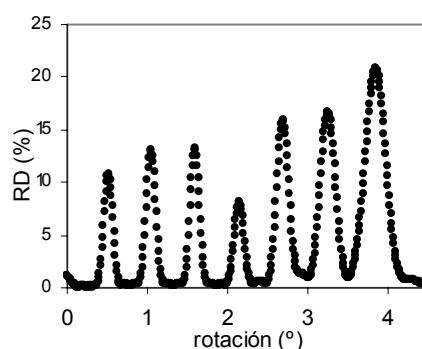


Fig. 1: Respuesta angular de 7 redes de difracción multiplexadas en una capa de fotopolímero de 0.8 mm.

El orden que hemos seguido para almacenar las 7 redes fue almacenar primero la de la derecha y por último se grabó la red de la izquierda. Después de ajustar las respuestas angulares con Kogelnik obtuvimos los datos (espesor óptico efectivo del material, d_{eff} , y modulación de índice media, n_{avg}) que se presenta en la Tabla I. En esta tabla se pudo ver además como los tiempos necesarios para almacenar cada red han de aumentar en cada paso del multiplexado, pues cada vez queda menos monómero en la película de fotopolímero. Por el contrario la modulación de índice conseguida va disminuyendo por el mismo motivo. No obstante, el parámetro que presenta un comportamiento más interesante es el espesor óptico efectivo del material.

Para hologramas de volumen el rendimiento en difracción es función del producto $d_{eff} \cdot n_{avg}$, por lo que a la hora de diseñar esquemas de multiplexado teóricos para almacenar un alto número de hologramas con el mismo rendimiento en difracción [10] será necesario tener en cuenta como es la variación de d_{eff} en cada material.

d_{eff} es de vital importancia a la hora de almacenar multitud de hologramas en el material, pues nos dará la distancia angular mínima de separación entre dos hologramas consecutivos [10]. Además las redes muy inclinadas se registran con cierta dificultad en el material [5]. Analizando la evolución de este parámetro observamos como los primeros hologramas no consiguen almacenarse en todo el grosor de la película (800 μm) al absorberse toda la luz en la primera parte del material. A medida que el colorante se va consumiendo, la transparencia de la película para la longitud de onda de registro va aumentando, por lo que cada vez el espesor de las redes crece hasta alcanzar su valor máximo (600 μm) que está por debajo del espesor físico del material. A partir de este momento en los siguientes hologramas se observa un ligero descenso del espesor. Esto puede ser debido a que en la primera parte del material ya se ha consumido todo el monómero, por lo que los nuevos hologramas se almacenan en la última parte del material donde todavía queda monómero libre.

Red	Tiempo de exposición ($\pm 1.5\text{s}$)	d_{eff} (μm)	n_{avg} ($\times 10^{-5}$)
1	5.1	240	45
2	5.7	310	30
3	8.1	400	23
4	6.4	490	14
5	7.8	600	15
6	9.3	575	14
7	11	570	13.5

Tabla 1: Tiempos de exposición, espesor óptico efectivo (d_{eff}) y modulación de índice media (n_{avg}) de las 7 redes almacenadas correspondientes a la Fig.1.

Con la idea de comprobar esta última hipótesis, y ver si realmente a partir de un valor máximo del espesor óptico, éste empieza a decrecer, decidi-

mos almacenar un mayor número de hologramas aprovechando al máximo la cantidad de monómero de la película. El resultado se muestra en la figura 2, donde se representa la respuesta angular de 16 hologramas multiplexados.

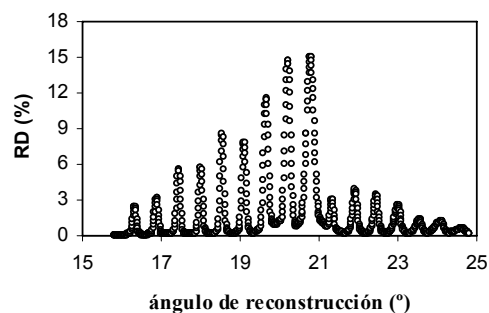


Fig. 2: Respuesta angular de 16 redes de difracción multiplexadas en un capa de fotopolímero de 0.8 mm.

Red	d_{eff} (μm)	Red	d_{eff} (μm)
1	300	9	670
2	440	10	670
3	540	11	600
4	610	12	570
5	630	13	520
6	650	14	420
7	670	15	400
8	670	16	300

Tabla 2: Espesor óptico efectivo (d_{eff}) de las 16 redes almacenadas correspondientes a la Fig.2.

Del análisis conjunto de la Fig. 2 y la Tabla 2, vemos confirmado que después de alcanzar un espesor máximo (670 μm) al almacenar los hologramas 7-10, el espesor de los siguientes disminuye al haberse consumido el monómero de la primera parte del material.

Continuando el análisis del multiplexado de hologramas en fotopolímeros también hemos estudia-

do como se comporta el material cuando se almacenan 60 hologramas. Para almacenar este elevado número de redes de difracción con el mismo rendimiento en difracción hemos utilizado un algoritmo empírico propuesto por Psaltis [11], que nos ha proporcionado unos buenos resultados [12]. Los tiempos a los que es necesario exponer el material los hemos representado en la Fig. 3, donde se observa como para los últimos hologramas el tiempo de exposición necesario para alcanzar un rendimiento en difracción del orden del 2%, aumenta exponencialmente.

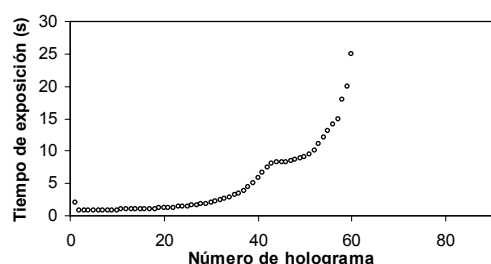


Fig. 3: Tiempos de exposición utilizados para almacenar 60 redes multiplexadas en una capa de fotopolímero de 0.8 mm.

Los rendimientos en difracción de cada holograma los hemos representado en la Fig. 4. Donde vemos que el método utilizado nos proporciona unos resultados aceptables, aunque mejorables.

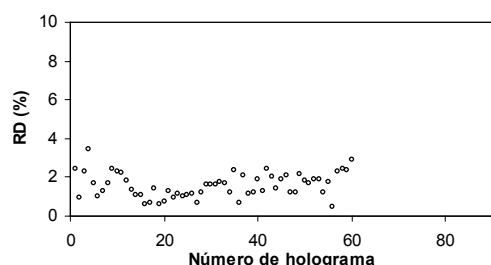


Fig. 4: Rendimiento en difracción de 60 redes multiplexadas en una capa de fotopolímero de 0.8 mm.

Por último vamos a analizar la evolución del espesor óptico efectivo de los hologramas almacenados (Fig. 5). Observando la Fig. 5 podemos comprobar un comportamiento similar al de la Tabla 2. El espesor de los hologramas crece hasta un máximo de 500 μm y posteriormente decrece. Este máximo es sensiblemente inferior al anterior, debido a que se buscan rendimientos en difracción menores (para poder almacenar mayor número de hologramas) por lo que la exposición se detiene antes de que el proceso de almacenamiento pueda penetrar suficientemente en el material.

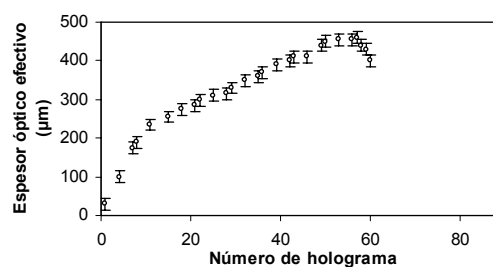


Fig. 5: Espesor óptico efectivo de 60 redes multiplexadas en una capa de fotopolímero de 0.8 mm.

Un problema que se observó al multiplexar 60 hologramas fue el pequeño espesor de los primeros hologramas que fue el causante del acoplamiento de las respuestas angulares de los mismos [12], este efecto dificultó la lectura separada de los 10 primeros hologramas.

4.- Conclusión

Para optimizar el multiplexado de hologramas en un fotopolímero basado en PVA/AA hemos analizado los hologramas almacenados. De dicho estudio hemos visto la importancia de controlar como cambia el espesor de los hologramas a la hora de diseñar esquemas de multiplexado teóricos como para poder obtener la mínima separación entre dos hologramas consecutivos y maximizar la capacidad de las memorias holográficas.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y ciencia” bajo los proyectos FIS2005-05881-C02-01 y FIS2005-05881-C02-02

Referencias

- [1] D. A. Waldman, C. J. Butler, and D. H. Raguin, “CROP holographic storage media for optical data storage at greater than 100 bits/ μm^2 ,” in Organic Holographic Materials and Applications, **5316** (SPIE, San Diego, 2003).
- [2] W.L. Wilson, K.R. Curtis, K. Anderson, M. C. Tackitt, A. J. Hill, M. Pane, C. Stanhope, T. Earhart, W. Loechel, C. Bergman, K. Wolfgang, C. Shuman, G. Hertrich, K. Parris, K. Malang, B. Riley and M. Ayer, “Realization of high performance holographic data storage: The inPhase Technologies demonstration platform,” Proc. SPIE **5216**, 178-191, (2003).
- [3] H. Fleisher, P. Pengelly, J. Reynolds, R. Schools and G. Sincerbox, “An optically accessed memory using the lippmann process for information storage” Optical

- and Electro-optical Information Processing, 1-30 (1965).
- [4] E.N. Leith, A. Kozma, J. Upatnieks, J. Marks and N. Massey, "Holographic data storage in three-dimensional media". *Appl. Opt.* **5** (8), 1303-1311 (1966).
 - [5] H. J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox, eds., *Holographic Data Storage*, Springer Series in Optical Sciences, (Springer-Verlag, Berlin, 2000).
 - [6] C. Neipp, J. T. Sheridan, S. Gallego, M. Ortuño, I. Pascual and A. Beléndez "Effect of a depth attenuated refractive index profile in the angular responses of the efficiency of higher orders in volume gratings recorded in a PVA/Acrylamide photopolymer," *Opt.Com.* **233**, 311-322, (2004).
 - [7] S. Gallego, M. Ortuño, C. Neipp, A. Márquez, A. Beléndez, E. Fernández, I. Pascual "3-dimensional characterization of thick grating formation in PVA/AA based photopolymer," *Opt. Express* **14**, 5121-5128, (2006).
 - [8] M. Ortuño, S. Gallego, C. García, C. Neipp, A. Beléndez and I. Pascual, "Optimization of a 1 mm thick PVA/acrylamide recording material to obtain holographic memories: method of preparation and holographic properties," *Appl. Phys. B* **76**, 851-857 (2003).
 - [9] H. Kogelnik, "Coupled wave theory for thick hologram gratings", *Bell Systems Technology Journal* **48**, 2909-2947 (1969).
 - [10] J. T. Sheridan, F. T. O'Neill, and J. V. Kelly, "Holographic data storage: optimized scheduling using the non local polymerization-driven diffusion model," *J. Opt. Soc. Am. B* **20**, 1443-1451 (2004).
 - [11] A. Pu, D. Psaltis, "High-density recording in photopolymer-based holographic three-dimensional disks", *Appl. Opt.* **35**, 2389-2398, (1996).
 - [12] E. Fernández, C. García, M. Ortuño, S. Gallego, A. Belendez, I. Pascual, "Optimization of a thick PVA/acrylamide photopolymer for data storage using a combination of angular and peristrophic holographic multiplexing", *Appl. Opt.* **45**, 7661-7666 (2006).